第2章

ハイビジョン・システム開発の手引き

── データ・ストリームを合成・分離・加工するディジタル放送送出システムに必要な機能

谷津 純一

圧縮後でも8Mbps～20Mbpsと高速なハイビジョン信号を扱うシステムにおいては，FPGAやDSP，CPUの選択がシステムの性能を大きく左右する．ここでは，「映像」，「音声」，「番組に付随する情報」を同一のストリームに多重化するシステムを例に，どの程度のハードウェアを準備すれば，どのくらいのデータを転送したり加工したりできるのかを示す．（編集部）

ここでは，ディジタル放送の送信・受信の流れを説明し，そこにどのような機能が要求されるのかを述べます．また，それらの機能ブロックに必要な処理や性能を示し，それらがどのようなハードウェアやソフトウェアで実現されるのかを検討します．本稿で解説するのは，**図1**に示すディジタル放送の送受信の流れのうち，灰色のブロックの範囲です．

MPEG-2エンコーダを搭載するシステムによって放送される番組の，送出装置と受信機器の基本的なブロック構成を**図2**および**図3**に示します．なお，データの流れだけを示すために省略してありますが，映像と音声の符号化および復号化においてはDSPを，また，データの符号化やパケタイザ，マルチプレクサ，デマルチプレクサ，データ処理ではCPUやDSPを使う場合が多いようです．ただし，民生機器における符号化・復号化には専用LSIを使う場合がほとんどで，受信機用の復号LSIには，デマルチプレクサの機能も搭載している品種が多くあります．

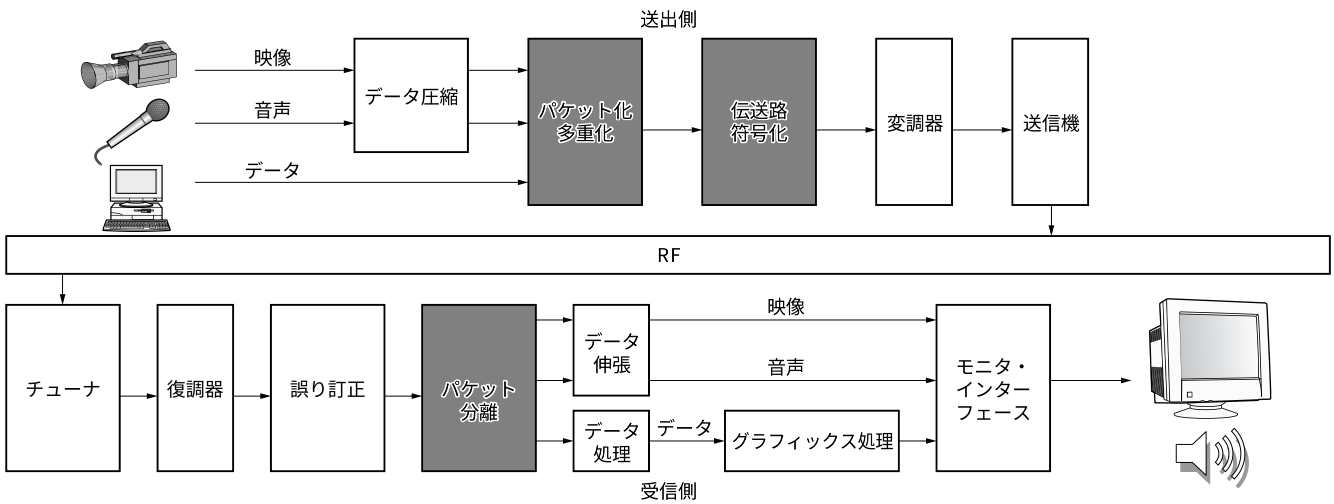


図1　ディジタル放送の送信・受信の流れ
本稿では灰色のブロックをおもに説明する

KeyWord　ビット・レート，Iピクチャ，Pピクチャ，Bピクチャ，ISO/IEC 13818-7，AAC，ISO/IEC 13818-6，DSM-CC，ES，エレメンタリ・ストリーム，PES，パケタイズド・エレメンタリ・ストリーム，ISO/IEC 13818-1

1. ディジタル放送用パケットの基礎知識

BSデジタル放送および110度CS放送では，1送信機当たり約51Mbpsをハイビジョン2局で分割し，地上デジタル放送では約23Mbpsを1局で使っています．

● ビット・レートを落とすためにまずは圧縮

ハイビジョンの映像だけのデータ容量は，エンコーダによって異なります．その値は一般的には8Mbps～20Mbpsです．この値の差は，エンコーダにおける圧縮アルゴリズムや，動きベクトル検出アルゴリズムの性能によるところが大きいでしょう．ハイビジョン番組のデータには，映像のほかに音声，データ放送，番組情報などが含まれています．これらのデータはすべて1Mbps以下と考えてよいでしょう．

画像のMPEG-2圧縮では，一般には15フレーム程度の画像を一つのまとまりであるGOP（group of picture）ごとに分割し，過去と未来のフレームから物体の動きを参照して，その変化分を伝送する方法をとります．参照される元となるフレームをIピクチャ，Iピクチャを参照しながら，みずからも参照されるフレームをPピクチャ，ほかのフレームから参照されず，もっぱら過去と未来のフレームを参照するだけのフレームをBピクチャと呼び，その参照関係は**図4**のようになります．このため，フレームごとのデータ量は通常，Iピクチャ ＞ Pピクチャ ＞ Bピクチャとなります．ただし，動きの早い画像の場合，Bピクチャでも

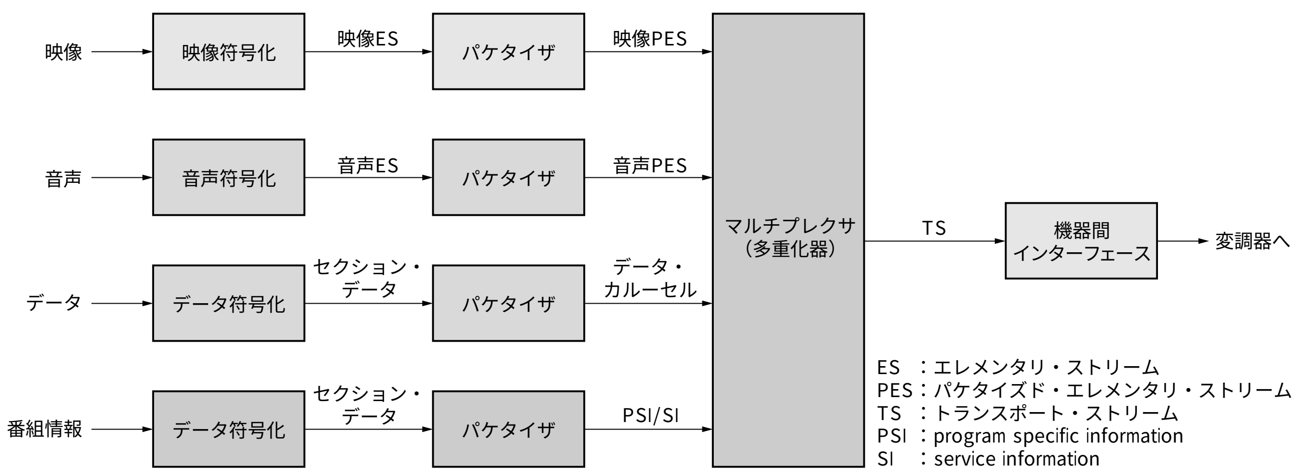


図2　ディジタル放送送出側の基本的なブロック図
放送機器の送信ブロックを想定している

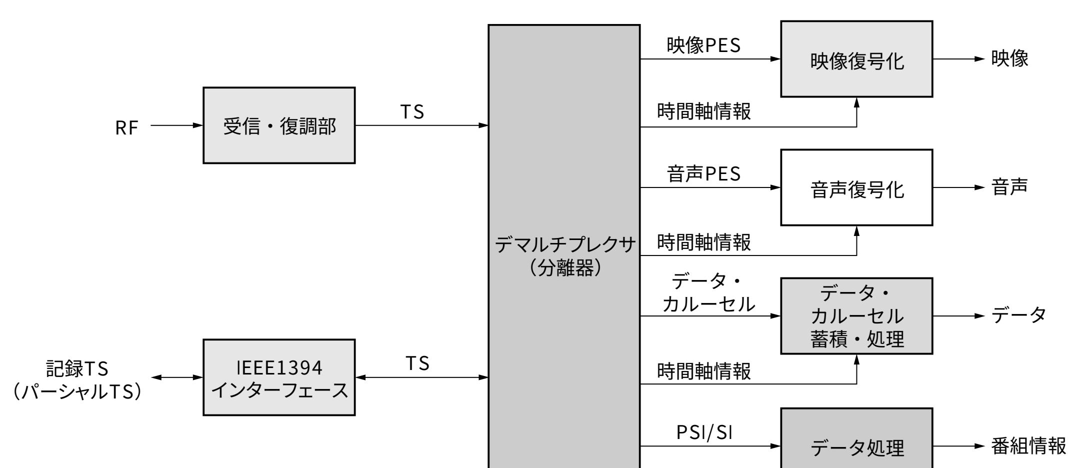


図3　ディジタル放送受信側の基本的なブロック図
テレビやHDDレコーダなどの受信ブロックを想定している

ほかのフレームからの差分だけで表すことができず，結果的にIピクチャと同じ構成になってしまい，データ量が増えることもあります．また，スタジオ内で使う画像の場合，フレーム単位の編集が可能なように，すべてのフレームをIピクチャで圧縮する場合もあります．IピクチャはJPEGと同じフレーム内圧縮となるので，このような場合，PピクチャやBピクチャを使用した場合よりもデータ量は増加します．

ディジタル放送では，音声やデータ放送用のパケット，番組情報などが送出されています．これらのデータ構造についても，規格で定められています（音声はISO/IEC 13818-7（AAC），データ放送はISO/IEC 13818-6（DSM-CC））．番組情報やそのほかの情報については，DVB規格やARIB規格で定められています．

● 圧縮されたビデオ信号はPESになる

圧縮したデータをES（エレメンタリ・ストリーム）と呼び，例えばそれをフレームごと，一定バイト数ごとにまとめて，ヘッダ情報を付加したものをPES（パケタイズド・エレメンタリ・ストリーム）と呼びます．

PESヘッダには，ストリーム種別（映像，音声，データなどの種別），スクランブル（暗号化）の情報，タイム・スタンプと呼ばれる解凍・再生時刻情報などが含まれています．映像のPESなどは非常に長いため，このPESをさらに伝送用に短くし，ヘッダを付けてパケット化したものをTS（トランスポート・ストリーム）と呼びます．TSパケットはヘッダを含めて188バイトの固定長です．ただしディジタル放送では，188バイトの後にエラー訂正用のリード・ソロモン符号が16バイト付いて，全体で204バイトになります．TSパケットとPESの構造は国際規格のISO/IEC

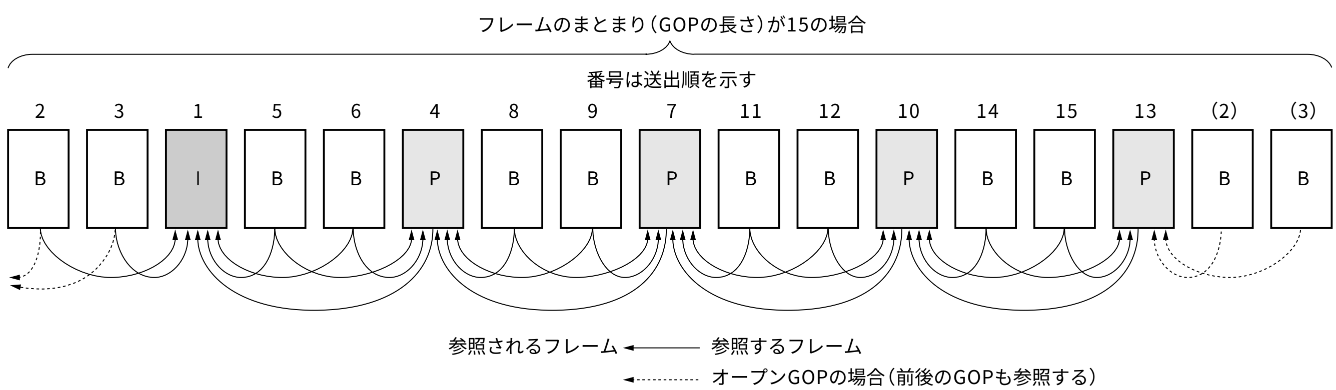


図4 GOPとIピクチャ，Pピクチャ，Bピクチャの参照関係
参照元となるフレームをIピクチャ，Iピクチャを参照しながら，みずからも参照されるフレームをPピクチャ，ほかのフレームから参照されず，もっぱら過去と未来のフレームを参照するだけのフレームをBピクチャと呼ぶ

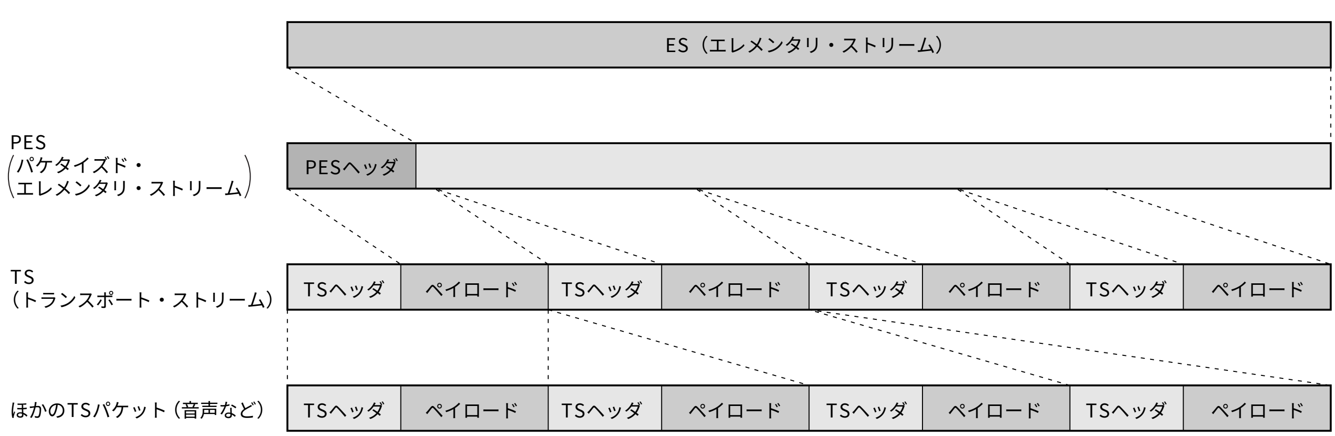


図5 ESとPES，TSの関係
圧縮したデータをESと呼び，例えばそれをフレームごと，一定バイト数ごとにまとめて，ヘッダ情報を付加したものをPESと呼ぶ

13818-1規格によって決まっています（**図5**）.

TSでは，映像と音声の符号化データのほかに，データ放送用のデータや番組情報のデータなどを合わせて伝送します．このような場合にはPESではなく，セクションと呼ばれるデータ形式が使われます．このセクションについても，ISO/IEC 13818-1規格によって定められています．

● TSはPESを伝送用に短くしたもの

ディジタル放送の伝送路上で，もっとも頻繁に取り扱うのがこのトランスポート・ストリーム（TS）です．TSパケットのヘッダ構造の詳細は下掲のコラム「TSパケットのヘッダ構造とストリームの付加情報」を参照してください．

2．ハードウェアの選びかた

ここまではストリームの容量や構造について，規格を元に紹介してきました．以降はストリームを合成・分離・加工するための具体的な回路構成や方法について，ポイント

COLUMN

TSパケットのヘッダ構造とストリームの付加情報

● TSパケットのヘッダ構造

TSパケットのヘッダ構造を**図A-1**に示します．

1）**同期バイト**（シンク・バイト）

TSパケットの同期を取るためのバイトで，値は`0x47`固定です．ほかのフィールドでこの値が繰り返し現れるようなデータを作ることは禁止されています．

2）**伝送エラー表示**（トランスポート・エラー・インジケータ）

このフィールドが‘1’のとき，そのTSパケットのデータには少なくとも1バイトの訂正不能なエラーが含まれていることを示します．

3）**ユニット開始指示**（ペイロード・ユニット・スタート・インジケータ）

このフィールドが‘1’のとき，ペイロードがPESデータの場合は，PESがこのTSパケットで始まることを示します．またペイロードがセクション・データのとき，なんらかのセクションがこのTSパケットで開始されます．したがってセクションの開始点を示す「ポインタ・フィールド」が存在することを示します．

4）**パケットID**（PID）

このTSパケットに独自に割り振られた番号を13ビットで示します．このPIDを用いて，映像や音声，データなどのパケットを識別できます．なお，`0x0000`から始まる値の小さいIDは，ISO/IEC規格やDTV規格（各国のデジタル・テレビ規格の総称），ARIB規格で予約されているので，ユーザが割り振れるPIDの範囲は決まっています．またPID `0x1FFF`はヌル・パケットと呼ばれ，何も伝送しない特殊なパケットとして予約されています．

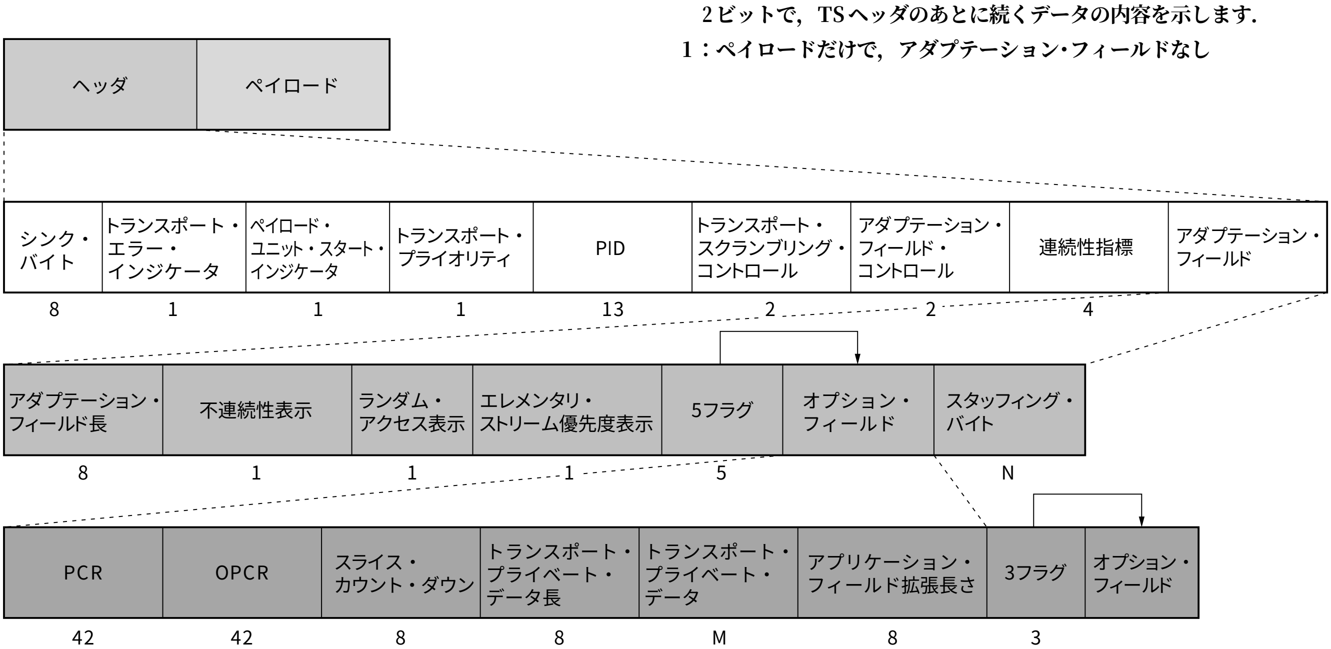
5）**スクランブル制御**（トランスポート・スクランブリング・コントロール）

ペイロード部分のスクランブルの有無およびスクランブルかぎの識別などを示します．

6）**アダプテーション・フィールド制御**（アダプテーション・フィールド・コントロール）

2ビットで，TSヘッダのあとに続くデータの内容を示します．

1：ペイロードだけで，アダプテーション・フィールドなし



図A-1　TSパケットのヘッダ構造

ディジタル放送の伝送路上で，もっとも頻繁に取り扱うのがこのTSである

となる事がらを説明していきます.

● CPUとDSP，選択の境界線

ストリームを処理するCPU(DSP)に求められる能力は，どのレイヤを処理するのか，どのような深い部分まで処理を行うのか，処理を実行するストリームのビット・レートはどの程度かなどによって大きく変わります.

● TS，PESの処理

TSやPESのヘッダ処理，例えばPIDの差し替えやPCRの差し替え，タイム・スタンプの書き換えだけを行う場合，さらにビット・レートが数十Mbpsまでの場合，それほど高い処理性能は必要とされません．数十MIPSのCPUまたは20MIPS程度の処理性能をもつDSPで十分でしょう.

● ESの処理

ESの処理，とくに圧縮されたビット列にまで処理が及ぶ場合，処理の内容によっては符号化するのに近い処理性能が要求されます．数百MIPS～数千MIPSを必要とすることもあります．符号化に近い処理を行う場合，組み込み用

2：アダプテーション・フィールドだけで，ペイロードなし
3：アダプテーション・フィールドの後にペイロードがある

7) **連続性指標**

4ビットのカウンタです．同じPIDを持つTSパケットが連続して受信されたかどうかを確認します．同じPIDのパケットの場合，プラス1ずつカウント・アップし，15までカウントしたあとは0に戻ります.

8) **アダプテーション・フィールド**

後述するPCRなど，TSに関する情報を伝送するために用いられる領域です.

9) **アダプテーション・フィールド長**

アダプテーション・フィールドがある場合，その長さを示します.

10) **不連続性表示**

'1'がセットされた場合，連続性指標または時間軸情報(PCR)のいずれかが不連続になったことを示します.

11) **PCR**(Program Clock Reference)

MPEG-2のシステムで伝送される番組は，映像と音声，データの同期を取るため，番組に関連するTSパケットがすべて同一の時間軸上で再生・提示されなければなりません．PCRはそのTSパケットが含まれる番組の現在時刻を示すもので，90kHzでカウントされる33ビットのカウンタと，27MHzでカウントされる9ビットのカウンタの二つで成り立っています.

MPEG-2の伝送モデルでは，送出側と受信側の時間軸の同期をこのPCRを使用したディジタルPLLで行うように規定しています(**図A-2**).

12) **スタッフィング・バイト**

アダプテーション・フィールドで，余った領域を埋めるためのバイトです．値は`0xFF`固定です.

13) **ペイロード**

映像，音声，データあるいは番組情報などを格納するためのデータ領域です.

● ストリームの付加情報

MPEG-2システムのデータ・ストリームを受信するには，希望のチャネルを構成するTSパケットを特定するためのセクション・データが必要になります．これらセクション・データもTSパケットで伝送されています.

1) **PAT**(Program Association Table)

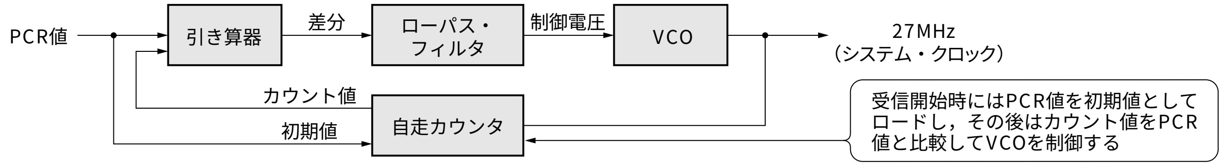
ストリームに一つだけ含まれ，チャネル番号と次に述べるPMTのPIDとの関連を示すセクションです．PATを含むTSパケットのPIDは`0x0000`で固定されています.

2) **PMT**(Program Map Table)

ストリームにチャネル数分含まれています．チャネル番号とPCRを含むTSパケットのPIDがかならず記述され，チャネルを構成する映像や音声，データなどのPIDが記述されています．受信する場合は，まずPATを取り込み，指定されたチャネル番号とPMTのPIDからPMTを取り込み，PMTから映像や音声のストリームを特定します.

3) **そのほか**

ディジタル放送ではこれ以外にネットワークの伝送情報(周波数などのパラメータ)を伝送するNIT(Network Information Table)，およびサービス情報や番組情報，スクランブル情報を伝送するセクションなどが多数定義されています.



図A-2　PCRを利用したPLL
MPEG-2の伝送モデルでは，送出側と受信側の時間軸の同期をこのPCRを使用したディジタルPLLで行うように規定している

のCPUでは対応が難しいでしょう．このような場合は5000 MIPS程度の処理性能をもつDSPを使うことになります．

● メモリ選択の境界線

圧縮されたハイビジョン・データを処理するのに必要なメモリは，以下の3種類になります．

● TSバッファ

TSパケットを受信するための小容量のバッファです．容量は規格により，ビット・レートからの計算で求めることになっています．小容量のFIFOやSRAM，ライン・メモリなどで構成できます．

● PESバッファ

TSパケットをPESに展開して保持するためのバッファです．PESをフレーム単位で送出したい場合は，少なくともIピクチャ用およびPピクチャ用のバッファを持つことになります．処理方法によってはBピクチャ用のバッファも必要になります．

● フレーム・メモリ

圧縮画像を解凍した後に，表示用のフレーム・メモリが必要になります．

ディジタル放送受信用のLSIなどは，内蔵のFIFOやSRAM，外付けのSDRAMなどにすべてのメモリ機能を持たせたものがほとんどで，単に画像を受信して再生するだけならばとくにメモリの追加は必要ありません．受信用のLSIを使わずに，特殊な再生や処理を行いたい場合には，PESバッファやフレーム・メモリが必要になります．

3．パケットの合成方法

ここでは，**図1**に示したディジタル放送の送出側において，映像や音声，データなどのパケットを一つのストリームに多重化する方法について説明します．

● ESからPESを合成する

ESからPESを合成する方法として，一般に以下のような処理が行われています．

● フレーム単位で送出

一つのピクチャを一つのPESとしてまとめ，送出します．この場合，PESごとのデータ量は，ピクチャによって大きく変化します．ただし，タイム・スタンプはフレームごとに一定間隔で加えることになるため，タイム・スタンプの計算が単純になります．フレーム単位で処理するようなアプリケーションにも向いています．

● 一定バイト数で送出

ピクチャには関係なく，ある程度のバイト数がたまった時点でPESにして送出します．PESごとのデータ量はあまり変化しません．したがって受信側での処理が一定間隔になります．ただし，タイム・スタンプの付加に計算を要します．また受信側において，フレーム単位でデータを処理したい場合には向いていません．

● PESからTSを合成する

PESからTSを合成するには，さまざまな方法が考えられます．代表的なものを二つ示します．

● 伝送レートを一定にする

ES（PES）のビット・レートを元にして，つねに一定量のTSパケットを送出する方法があります．この場合，映像や音声，データのパケットは，それぞれのビット・レートに合わせて混合され，送出されます．受信機側のTSバッファもつねに一定のデータを受け取るので，バッファにたまるデータの制御や転送が容易になります．ただし，送出側ではPESごとの送出レートの計算が必要になります．

● フレーム単位で送る

パケタイザによってPESが作成されるたびに，作成されたPESを一気に送出してしまう方法です．この場合，映像ならば映像，音声ならば音声のTSパケットが連続して送出されます．受信機側のバッファはIピクチャを受信したときなど，一時的に大きな容量が必要になったり，転送が集中したりすることがあります．

● TSの受信と分離後の再送信

TSの受信は以下の順に行います．

1）PAT受信，チャネル番号の指定，PAT解析，PMT PIDの確定
2）PMT受信，PMT解析，PCR PIDおよびES PIDの確定
3）PCRおよびESを含むTSパケットをPIDのフィルタリングにより受信
4）TSからPESおよびセクションを再構成，PCRから時刻情報を再生
5）PESからESを抽出，解凍．セクションのデコード，提示

TSの分離は以下の順に行います．

1）フィルタリングするPIDの設定

2）TSパケットの受信．PATやPMTの受信と蓄積．必要に応じてPATやPMTを書き換え保存
3）TSパケットをPIDフィルタにより再送出するかどうかを切り分け
4）再送出するTSパケットを送出．再送出しないものは破棄し，ヌル・パケットに置き換えて送出．保存したPATやPMTを送出

● DSPとFPGAの役割分担

パケットの合成は通常，DSPまたはFPGAで行います．CPUは命令の実行時間が確定できないので，使用には適しません．

そこで，システムを設計する際に，FPGAとDSPのどちらに何の機能を分担させるのかが問題となります．DSPは加減乗除などの演算を実現するのに適していますし，条件分岐するような処理も簡単に実現できます．また，ビットごとにリアルタイムに処理しなくてもよい機能もDSPで実現できます．さらに，機種ごとに変更が予想されるような機能は，FPGAよりもDSPで実現したほうが変更が容易です[注1]．

したがって，DSPには以下のような機能を割り当てます．

- TSヘッダのデータの付け替え（例えばPID，PCR）
- PESヘッダの付け替え（例えばタイム・スタンプ）
- 番組情報の書き換え（再送信の場合など）
- 番組情報の書き換えにおいて，セクションのCRCの再計算や書き換え
- ストリーム処理のうち，復号化，符号化を要求されるような処理で，FPGAでは複雑すぎるもの

DSPでは実現できないような，ビット単位のリアルタイム処理が必要な機能や，より物理層に近い機能は，FPGAで実現させるとよいでしょう．また規格で決まっているような，開発後に変更の少ない機能はFPGAに盛り込みます．

具体的には，以下のような機能を割り当てます．

- 転送レートの詳細な制御
- パケットの同期検出・制御
- リード・ソロモン・エラー訂正符号の計算
- ストリーム処理のうち，ビット列の操作などの単純なもの

4．ソフトウェア開発前の検討事項

MPEG-2システムを機能させるためのソフトウェアを開発する際には，以下のような点に留意します．

● 必要な実行速度を満たすハードウェアを見極める

リアルタイムで処理・送出などを行わなければならないシステムにおいて，ある課題を実現できるかどうかを見極めるいちばんのポイントは実行速度です．採用するCPUやDSPのクロック速度と処理速度が「～20数Mbps（ハイビジョン1チャネルの場合）」のストリームを処理できる/できないが重要になります．

実行予定の処理が，ヘッダ部分などに限定されていれば，処理の遅いデバイスでも実現は可能ですが，符号化･復号化に近い処理を行う場合は高性能なデバイスが必要となります．ロング･ワード単位の演算だけで済むのか，バイト単位の演算が必要なのか，あるいはビット単位で処理しなければならないのかなども実行速度を左右します．非リアルタイムで処理するシステムであれば，処理時間が受容できさえすれば，当然性能の低いシステムでも実現が可能です．

● リアルタイムOSの必要性を見極める

リアルタイム処理を行うとき，OSをどうするかによって，性能や開発のしやすさに差が生じます．OSを使わずにシングル・タスクで実現すれば，処理速度はもっとも速くなりますが，複雑な処理を行うにつれてプログラムは複雑になります．ストリームに対して複数の処理を行いたい場合や複数のストリームを扱いたい場合，シングル・タスクの中で複数の処理をコーディングしなければならなくなるため，プログラムはかなり複雑になり，デバッグも難しくなります．

しかし，必要な処理をリアルタイムOS上にタスクで実現すれば，カーネルやタスク切り替えのオーバヘッドが発生するため，処理速度はシングル・タスクの場合より落ちてしまいます．ストリームの処理時間に加えて，設計者がこのあたりの時間をどの程度まで正確に見積もれるのかが，かぎとなります．

注1：DSPであれば，プログラムの書き換えだけでアプリケーションの変更などに対応できる．例えばインターネットからダウンロードするだけで，客先でも変更が可能．FPGAを書き換える場合は特殊な回路を外付けし，専用の書き換えソフトウェアを使用するか，ライタを持ち込んでオフラインで書き換えることになる．

複数の処理を行う場合などは，それぞれの処理を分割してコーディングし，デバッグできるため，一つ一つのタスクは単純になり，デバッグも行いやすくなります．また，シングル・タスクの場合よりも，タスクを数名で分担して作るほうが，作業は楽になります．

非リアルタイムのOS上で開発する際には，実行速度の見積もりが難しくなります．リアルタイムOSと異なり，割り込みやタスク・スイッチなどの処理時間が保証されていないからです．しかし，処理そのものが軽く，実行速度に余裕があり，さらに開発環境に慣れていれば，もっとも開発しやすい環境といえるでしょう．

● 既製のソフトウェアを活用する

多くのプロセッサ・メーカやサード・パーティから，MPEG-2の映像と音声の圧縮・伸張用ライブラリが販売されています．このようなライブラリはごく一般的な使いかたを前提に設計されているため，開発目的が圧縮・伸張だけであればそのまま使用できます．しかし，処理内容がライブラリの提供する機能以上のもの，例えば特殊再生などを要求する場合は，その部分を開発することになります．また，ライブラリのソース・コードが開示されていれば，コードの改変によって必要な機能を実現できる場合があります．市販のライブラリでは，使うCPUやDSP，OSの種類などに制限があるものが多いので，その点にも注意が必要です．

5. パケット合成後のデータを次ブロックへ転送する

合成したTSパケットは，**図2**で示した機器間インターフェースを通じて，ほかの機器（ディジタル放送送信側では変調器，受信機ではビデオ・デコーダやビデオ・カメラなどのディジタル録画機）に渡されます．

TSの場合，ISO/IEC規格では伝送する物理層は規定されていません．ただし，ディジタル放送で一般に運用される欧州のDVB規格では，以下の三つの物理層が規定されています．

- **ASI**（Asynchronous Serial Interface）

8b/10b符号とFibre Channelの物理層を使うシリアル・インターフェースです．Fibre Channel用のインターフェースLSIを使うか，FPGAの外部ピンのI/OライブラリにFibre Channel対応のものがあれば，それで実現します．もっとも一般的に使用されている物理層です．

- **SPI**（Synchronous Parallel Interface）

LVDSの差動信号で8ビット・パラレルの物理層を使用し，1バイトずつクロックで送受信するインターフェースです．ASIに次いで広く使われています．

- **SSI**（Synchronous Serial Interface）

バイフェーズ・マークと独自の物理層を使用し，1ビットを1クロックで送受信するシリアル・インターフェースです．あまり一般的ではありません．

民生機器ではTSの送受信にIEEE 1394を，通信機器では一般にATM（asynchronous transfer mode）を使用します．これらはIEEE 1394およびATMの規格として定められています．

- **MPEG-over-1394**

ディジタル受信機とディジタル録画機器の接続によく使われます．188バイトのTSパケットに4バイトのヘッダを付加し，IEEE 1394のアイソクロナス・パケットのデータとして送受信します．物理層は1394と同じで，基本的にはAVプロトコルとAV/Cコマンド・セットを使用します．

- **MPEG-over-ATM**

ディジタル放送では局間や中継所との送受信に使われます．188バイトのTSパケットを48バイトのATMパケットに当てはめて転送します．物理層は機器によりさまざまです．

やつ・じゅんいち